

헥사그리드 고층건물구조의 예비설계를 위한 단순모델

이한울, 김영찬*
부경대학교 건축공학과

Simple Model for Preliminary Design of Hexagrid Tall Building Structure

Han-Ui Lee, Young-Chan Kim*

Department of Architectural Engineering, Pukyong National University

요약 시대적 흐름에 따라 고층 건물은 정형적인 형태에서 벗어나 비정형적인 형태로 변화하고 있고 최근에는 외주골조에 기하학적 그리드 패턴으로 부재를 배치하고 있다. 본 연구에서는 헥사그리드구조의 부재선정을 위한 소요단면2차모멘트 산정식을 제안하였다. 헥사그리드 고층건물의 외주골조에 동일한 단면을 사용한 기존연구와는 다르게 수평·대각 부재와 모듈의 위치에 따라 부재사이즈를 변경하였다. 헥사그리드 유닛사이즈가 구조성능에 미치는 영향을 검토하기 위해 모듈의 높이를 1개층, 2개층, 4개층 높이로 한 60층 건물을 설계하여 해석하였다. 15개 건물에 대한 최대 횡변위, 철골량, 중력하중과 횡하중에 대한 외주골조의 횡력 분담비율, 부재의 조합 강도비를 비교하였다. 헥사그리드 구조의 횡력분담 능력이 다이아그리드 구조에 비해 작아서 헥사그리드 구조에서는 코어골조에 적절한 횡강성을 배분해야 한다. 횡변형 대 전단변형의 비는 4가 가장 적합하였고 부재간 접합에 따른 시공비용 및 구조적 효율성으로 판단할 때 헥사그리드 유닛이 큰 것이 유리하다고 판단된다. 건물의 최대 횡변위가 제한치의 84%~108%로 나와 헥사그리드 건물의 예비설계에 적용 가능한 것으로 보인다.

Abstract High-rise building shapes are changing from orthogonal to irregular form and the current trend is to arrange members in geometric grid-patterns at the perimeter of buildings. This study proposes a simple model for the preliminary design of a hexagrid high-rise building. The size of the cross section is set to be different at each module and hexagrid unit, which is different from the previous studies in which all hexagrid members were the same. To examine the effect of hexagrid size on structural performance, 60-story hexagrid buildings with 1-, 2- and 4-story high modules are designed and analyzed. Maximum lateral displacement, steel tonnage, load carrying percentage of perimeter frame and combined strength ratio are compared for 15 buildings. As the lateral load carrying capacity of hexagrid structure was inferior to a diagrid structural system, proper lateral stiffness should be allocated to the core frame in a hexagrid structure. The best ratio of flexural to shear deformation was 4 and larger unit size was better in considering constructional cost and structural efficiency. As the maximum lateral displacements of the buildings were within 84%~108% of the limit, the proposed method seems to be applicable to preliminary design of hexagrid buildings.

Keywords : Combined strength ratio, Hexagrid, Preliminary design, Simple model, Tall building

1. 서론

최근 시대적 흐름에 따라 고층 건물은 정형적인 형상에서 벗어나 비정형적인 형상[1,2]으로 변화하고 있고 이를 반영하여 건축물 외부에 그리드 패턴으로 외주 골

조를 배치하는 건축물이 등장하고 있다.

고층건물에 헥사그리드 구조를 적용한 기존 연구[3,4]에서는 횡력저항을 위한 헥사그리드 외주골조(perimeter frame)에 한가지의 단면 사이즈를 모든 외주골조 부재에 적용한 부재 선정방법을 제안하였다. 고층건물에서 한가

본 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Young-Chan Kim(Pukyong National Univ.)

Tel: +82-51-629-6091 email: yckim@pknu.ac.kr

Received February 6, 2017

Revised (1st April 20, 2017, 2nd May 19, 2017)

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

지의 단면 사이즈로 외주 구조체를 설계하는 것은 비효율적이다.

본 연구에서는 상기의 연구와는 다르게 헥사그리드 유닛의 수평·대각 부재와 모듈의 위치에 따라 단면 사이즈를 다르게 하여 외주골조를 설계하였다. 최대 횡변위의 제한값을 만족하는데 필요한 헥사그리드 부재의 단면 2차모멘트 산정식을 제안하였다. 이 식을 이용하여 헥사그리드 구조의 부재사이즈를 결정하였다.

헥사그리드 유닛의 크기에 따른 헥사그리드 구조의 성능변화를 알아보기 위해 3가지의 유닛 크기를 설정하여 60층 규모의 헥사그리드 구조를 설계하였다. 해석결과를 토대로 최대 횡변위, 철골량, 중력 및 횡하중에 대한 헥사그리드 골조의 하중분담율과 부재의 조합강도비를 비교하였다.

2. 단위 셀 변형의 단순모델

2.1 전단력에 의한 유닛 셀 부재의 변형

건물의 외주골조를 이루는 플랜지면(횡력과 수직하중 외주골조가 이루는 평면)과 웨브면(횡력과 평행하중 외주골조가 이루는 평면)에 배치된 대각부재와 수평부재는 Fig. 1과 같고 헥사그리드 유닛이 모여 모듈을 이룬다. 기존의 연구[3,4]와 다르게 모듈의 높이를 1개층으로 고정하지 않았다. 그리고 헥사그리드에서 반복되는 형태를 유닛 셀(unit cell)이라 칭하였다.

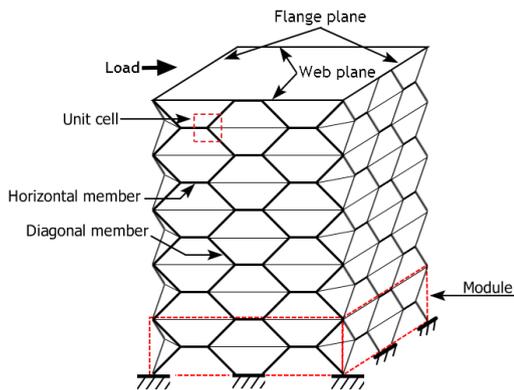


Fig. 1. Hexgrid members at the flange and web planes

헥사그리드 구조에 횡력이 작용하면 웨브면 대각수

평부재의 중간부분에 모멘트가 0인 변곡점이 생긴다[3]. 반복되는 헥사그리드의 유닛 셀을 분리하여 전단력에 의한 변형을 Fig. 2와 같이 가정하였다. 여기서 L_d , L_h 는 대각·수평부재의 길이이며, θ 는 대각부재의 각도이다.

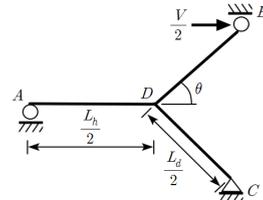


Fig. 2. Behavior of repetitive unit cell for shear

Fig. 2에서 힘의 평형조건을 이용하여 지지점에서 반력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_A = \frac{VL_d \sin \theta}{(L_h + L_d \cos \theta)}, R_B = R_C = \frac{1}{2} R_A \quad (1)$$

반복되는 유닛의 변형을 기존연구[3]와는 달리 대각부재와 수평부재를 분리하여 Fig. 3과 같이 단순화하였다. 수평부재의 축방향 변형은 무시하고 횡변위는 대각부재의 변형만 고려하였다. Fig. 3a의 대각부재 처짐은 캔틸레버 보의 처짐으로 단순화시키면 다음과 같다.

$$\delta_d = \frac{\left(\frac{V \sin \theta}{2} - R_B \cos \theta\right) \left(\frac{L_d}{2}\right)^3}{3EI_d} \quad (2)$$

$$= \frac{VL_h L_d^3 \sin \theta}{48EI_d (L_h + L_d \cos \theta)}$$

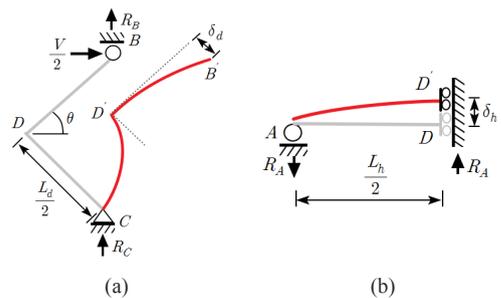


Fig. 3. Deformation of members due to shear (a)diagonal (b)horizontal

그리고 B점의 수평변위는 $\delta_B = 2\delta_d \sin\theta$ 이다. hexa-grid 유닛의 변형을 Fig. 4와 같이 복곡률로 가정하면 hexa-grid 변위는 B점의 두 배가 된다. 따라서 모듈의 횡변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta_s &= 4\delta_d \sin\theta \\ &= \frac{VL_h L_d^3 \sin^2\theta}{12EI_d(L_h + L_d \cos\theta)} \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 Fig. 3b에서 수평부재의 수직변위는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_h &= \frac{R_A \left(\frac{L_h}{2}\right)^3}{3EI_h} \\ &= \frac{VL_d L_h^3 \sin\theta}{24EI_h(L_h + L_d \cos\theta)} \end{aligned} \quad (4)$$

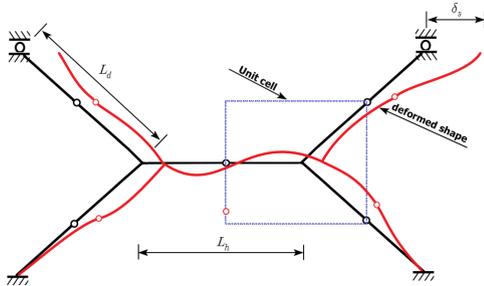


Fig. 4. Assumed deformation due to shear

식(4)는 유닛 셀에서 수평부재만을 분리한 변위이다. 그리고 Fig. 3b에서 D점의 수직방향 변위를 $\delta_d \cos\theta$ 으로 가정하면 $\delta_s = 4\delta_h \tan\theta$ 가 되고 여기에 식(4)를 대입하여 수평부재의 수평변위를 나타내면 다음과 같다.

$$\delta_s^h = \frac{VL_d L_h^3 \sin^2\theta}{6EI_h \cos\theta(L_h + L_d \cos\theta)} \quad (5)$$

2.2 모멘트에 의한 모듈의 변형

hexa-grid 구조의 플랜지면에 전도모멘트가 작용하면 수평부재에는 모멘트가 발생하지 않고 대각부재의 중간에서 모멘트가 0인 변곡점이 생긴다[3]. hexa-grid의

반복되는 유닛 셀을 분리하여 전도모멘트에 의한 변형을 Fig. 5와 같이 가정하였다.

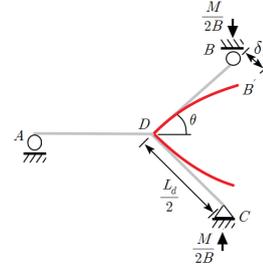


Fig. 5. Deformation of members due to overturning moment

전도모멘트에 의한 대각부재의 변형을 캔틸레버 보의 처짐으로 가정하여 구하면 다음과 같다.

$$\delta_d = \frac{ML_d^3 \cos\theta}{48BEI_d} \quad (6)$$

그리고 Fig. 5에서 대각부재의 수직변형은 다음과 같다.

$$\delta_m^h = 2\delta_d \cos\theta \quad (7)$$

hexa-grid의 변형은 Fig. 6과 같이 복곡률로 가정하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_m = 2\delta_m^h = 4\delta_d \cos\theta \quad (8)$$

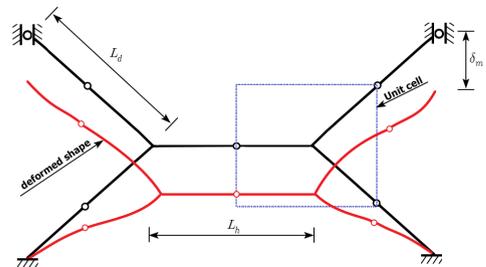


Fig. 6. Assumed deformation due to overturning moment

따라서 전도모멘트에 의한 모듈의 변위는 다음과 같다.

$$\delta_m = \frac{ML_d^3 \cos^2 \theta}{12 BEI_d} \quad (9)$$

2.3 강성기반의 소요단면2차모멘트

고층구조의 횡변위는 전단변형과 휨변형(Fig. 7)의 합으로 나타내면 다음과 같다[2].

$$u = \gamma H + \frac{\chi H^2}{2} \quad (10)$$

여기서 γ 는 전단변형률, χ 는 곡률이다. 기존연구[2]와 같이 휨변형 대 전단변형의 비를 s 라 하면

$$s = \frac{\frac{\chi H^2}{2}}{\gamma H} = \frac{H\chi}{2\gamma} \quad (11)$$

이다. 최대 허용 횡변위를 $H/500$ 라 하면

$$\begin{aligned} u &= \gamma H + \frac{\chi H^2}{2} \\ &= (1+s)H\gamma \\ &= \frac{H}{500} \end{aligned} \quad (12)$$

이고 전단변형률과 곡률을 s 로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{500(1+s)} \\ \chi &= \frac{s}{250(1+s)H} \end{aligned} \quad (13)$$

그리고 Fig. 7에서 전단변형률과 곡률은

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\delta_s}{H} \\ \chi &= \frac{2\delta_m}{BH} \end{aligned} \quad (14)$$

이다.

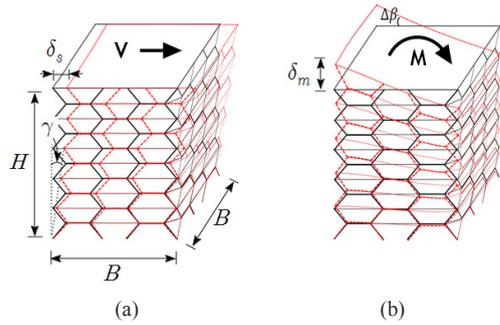


Fig. 7. Deformation of hexagrid unit (a) Shear (b) Flexural

식(3)과 식(9)를 식(13)과 식(14)에 적용하여 대각부재의 소요단면2차모멘트를 구하면

$$I_d^w = \frac{VL_h L_d^3 \sin^2 \theta}{12 E \gamma H (L_h + L_d \cos \theta)} \quad (15)$$

$$I_d^f = \frac{ML_d^3 \cos^2 \theta}{6 B^2 E \chi H}$$

이고 식(5)를 식(14)에 적용하여 수평부재의 소요단면2차모멘트를 구하면

$$I_h = \frac{VL_d L_h^3 \sin^2 \theta}{6 E \gamma H \cos \theta (L_h + L_d \cos \theta)} \quad (16)$$

이다. 여기서 I_d^w , I_d^f 는 모듈의 부재 단면2차모멘트의 합이며, L_d 대각부재의 전체 길이이다. 그리고 모듈의 높이가 1, 2, 4개 층이 될 수 있어 이에 대한 변형을 고려하여 소요단면2차모멘트는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_d^w &= \frac{2VL_h L_d^3 \sin^2 \theta}{3(N_d^w)^3 N_F E \gamma H (L_h + L_d \cos \theta)} \\ I_d^f &= \frac{4ML_d^3 \cos^2 \theta}{3(N_d^f)^3 N_F B^2 E \chi H} \end{aligned} \quad (17)$$

$$I_h = \frac{VL_d L_h^3 \sin^2 \theta}{6(N_h^w)^3 N_F E \gamma H \cos \theta (L_h + L_d \cos \theta)}$$

여기서, N_d^f 는 플랜지면의 대각부재 개수, N_d^w , N_h^w 는 웨브면의 대각·수평부재 개수이고 N_F 는 모듈당 층수를 나타낸다. I_d 는 웨브면과 플랜지 면 중 큰 값으로 결정한다.

3. 헥사그리드 건물의 설계 및 해석

3.1 해석건물의 개요

3가지 형태의 헥사그리드(HS-1, HS-2, HS-3)를 이용하여 60층 건물을 설계하였으며 각 모델의 사양이 Table 1에 나와 있다. 각 모델에서 부재의 크기는 식(17)를 이용하였고 γ 와 χ 는 식(13)에 $s=3, 4, 5, 6, 7$ 을 대입하여 구하였다. 건축구조기준[5]을 적용하여 고정하중은 4kN/m^2 , 활하중은 2.5kN/m^2 , 풍속은 38m/s 로 하였다. 헥사그리드 대각 수평 부재간의 집합은 강집합, 내부모와 외주기둥과의 연결은 핀집합으로 하였고, 구조해석은 Midas[6]를 이용하여 수행하였다. Fig. 8는 해석모델의 1층 기준 평면도이고 Fig. 9는 구조모델링에 의한 투시도이다. 헥사그리드 부재는 원형강관을 사용하였고 HS-3 모델의 부재사이즈는 Table 2와 같다.

Table 1. Module dimension and number of members

Model		HS-1	HS-2	HS-3
Module height(m)		3.9	7.8	15.6
no. of Module		60	30	15
no. of member per plane	Horizontal	420	120	45
	Diagonal	1,680	480	120
	Total	2,100	600	165

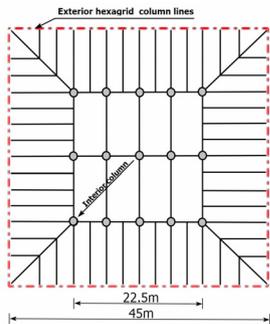


Fig. 8. Floor-framing plan of 60-story hexagrid building

Table 2. Member size of HS-3 Model($s=4$, unit:mm)

Story	$\phi^{1)}$	Thickness		Story	ϕ	Thickness	
		DM ²⁾	HM ³⁾			DM	HM
57-60	950	18	24	25-28	1,690	50	39
53-56	1,100	24	33	21-24	1,730	58	40
49-52	1,250	25	34	17-20	1,770	65	40
45-48	1,350	27	36	13-16	1,810	73	40
41-44	1,430	28	38	9-12	1,840	81	41
37-40	1,500	32	39	5-8	1,870	90	41
33-36	1,570	38	39	1-4	1,900	98	41
29-32	1,640	43	39				

note) 1-diameter, 2-Diagonal Member, 3-Horizontal Member

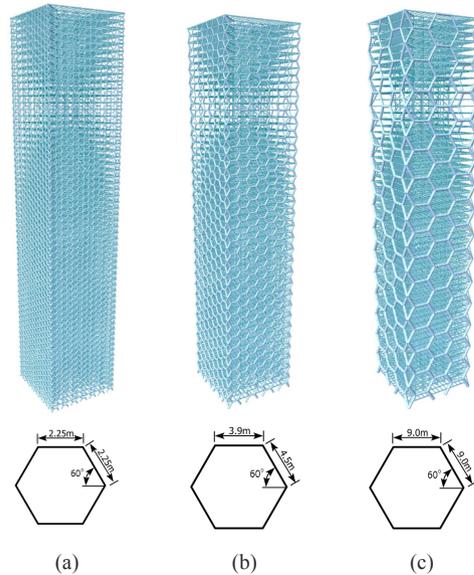


Fig. 9. Model rendering of 60-story hexagrid building and hexagrid unit size (a)HS-1 (b)HS-2 (c)HS-3

4. 해석결과의 분석

4.1 최대 횡변위

풍하중에 의한 최대 횡변위는 Table 3과 같으며 $s=4$ 의 경우가 가장 허용치에 근접하게 나왔다. s 값과 모듈의 크기에 따라 부재 사이즈가 바뀌어 건물의 횡강성이 달라진다. 식(17)을 기반으로 설계한 건물의 전산해석에서 최대 횡변위가 허용치의 84%($s=7$, HS-1)~108%($s=3$, HS-1)정도로 나와 식(17)을 예비설계 단계에서 부재배치의 영향을 검토하는데 활용할 수 있다고 생각된다.

Table 3. Maximum lateral displacement at the top (unit: cm)

s	Limit	HS-1	HS-2	HS-3
3	46.8	50.5	50.3	49.0
4		47.5	47.0	46.4
5		44.5	44.6	44.4
6		41.9	43.2	42.6
7		39.3	40.2	41.0

4.2 외주골조 부재의 하중분담률

외주골조의 하중분담 비율을 Fig. 10에 나타내었다. 외주골조 부재가 중력하중의 45~54%를 지지하는 반면 횡하중에 대해서는 HS-1모델과 HS-2모델이 77~80%, HS-3은 62~65%를 외주골조가 부담한다. 헥사그리드 구조는 코어 골조가 횡하중의 23~38%를 저항하므로 횡하중의 대부분을 저항하는 다이아그리드 구조[2]보다 효과적이지 못하다.

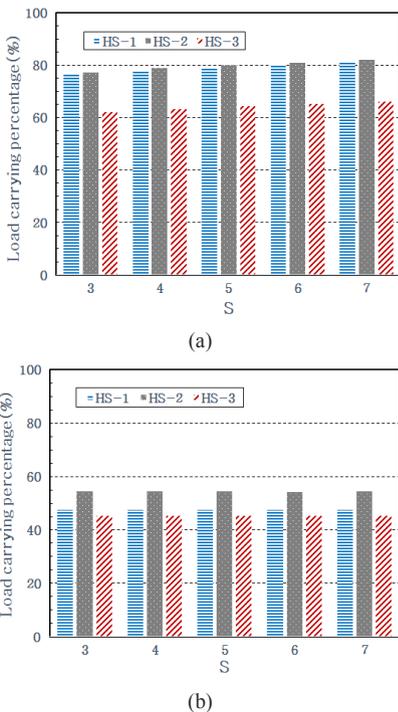


Fig. 10. Load distribution in exterior columns (a)Gravity load (b)Lateral load

4.3 소요 철골량

헥사그리드 유닛의 대각-수평부재에 대한 소요 철골

량이 Fig. 11에 나와 있다. 대각부재의 철골량이 수평부재에 비해 훨씬 많은 것을 알 수 있는데 이는 헥사그리드 유닛에서 대각부재가 횡력저항의 주된 역할을 하기 때문이다. 헥사그리드 유닛의 크기가 클수록 철골량이 적게 나왔다. 횡변위를 고려해도 HS-3모델이 가장 효율적이라 할 수 있다.

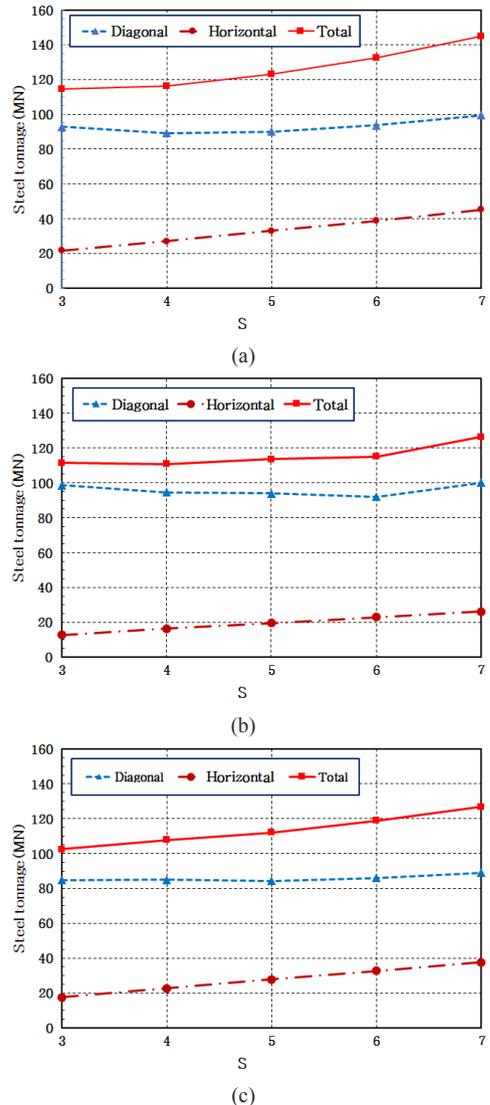


Fig. 11. Steel tonnage for hexagrid members (S=4) (a)HS-1 (b)HS-2 (c)HS-3

4.4 헥사그리드 부재의 조합 강도비

대각부재의 조합 강도비(R, Fig. 12)는 전반적으로 변

화가 적은 반면 수평부재(Fig. 13)는 HS-2, HS-3 모델에서 변화가 큰 것을 알 수 있다. 최대 횡면위가 허용치에 매우 근접한 HS-2, HS-3 모델($s=4$)에서 웨브면의 수평부재 R값이 1보다 커 응력이 초과한 것을 알 수 있다.

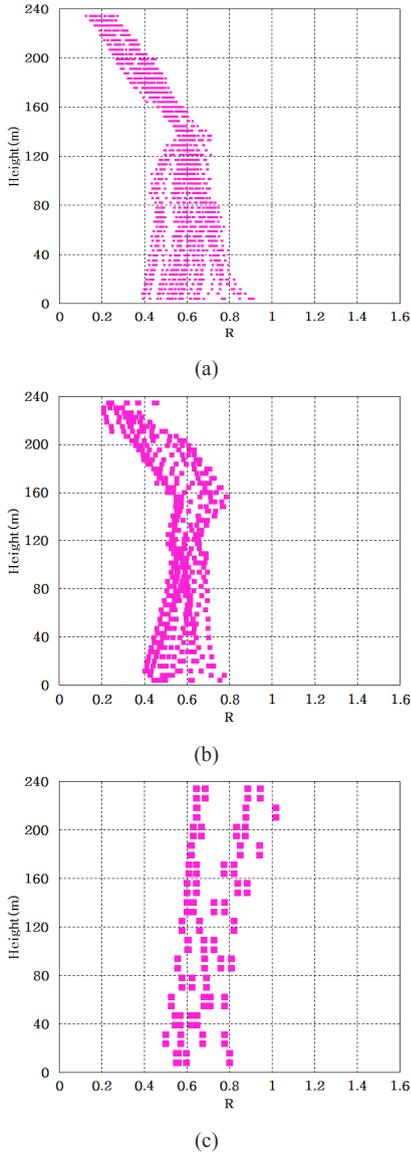


Fig. 12. Combined strength ratio of diagonal members ($S=4$) (a)HS-1 (b)HS-2 (c)HS-3

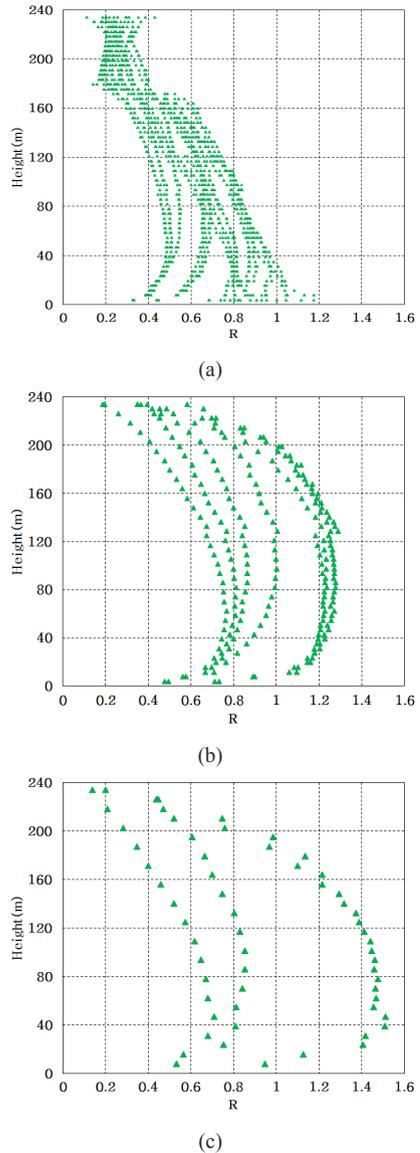


Fig. 13. Combined strength ratio of horizontal members ($S=4$) (a)HS-1 (b)HS-2 (c)HS-3

5. 결론

본 연구에서는 hexa-grid구조 고층건물의 예비설계 단계에서 적용 가능한 부재의 소요단면2차모멘트 산정식을 제안하였다. 이 식을 이용하여 설계한 60층 건물의 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) s값과 모듈의 크기에 따라 부재 단면의 크기가 변하는데 제안식을 적용하여 구한 최대 횡변위가 허용치의 84%(s=7, HS-1)에서 108%(s=3, HS-1)로 예비설계단계에서 부재배분의 영향을 검토하는데 적용할 수 있다고 판단된다.
- (2) 헥사그리드 부재의 중력하중 분담비율은 45~55%이나 횡하중에 대한 분담비율 60~80%로 다이아그리드 구조에 비해 횡력저항 성능이 약하여 코어골조의 횡강성이 적절하게 유지되어야 횡변위를 통제할 수 있다.
- (3) 최대 횡변위와 철골량으로 볼 때 s=4가 가장 적합한 것으로 보인다.
- (4) 대각부재는 층의 위치에 관계없이 균일하게 응력을 받고 있으나 웹면의 수평부재는 HS-2, HS-3 모듈의 중간 1/3부분에서 응력이 초과된 것을 알 수 있다.
- (5) 헥사그리드 유닛이 큰 모델이 횡변위와 소요 철골량의 측면에서 효율적이었는데 대각-수평부재간 그리고 헥사그리드 유닛간의 접합에 필요한 시공 비용을 고려하면 효율성은 더 커진다.

예비설계 단계로 살펴본 헥사그리드 구조의 횡력저항 성능이 다이아그리드 구조와는 약간 다르나 별집 모양인 건물의 입면(façade)은 미적 효과가 있고 헥사그리드 유닛의 모듈화된 생산과 시공을 고려한다면 새로운 구조시스템으로서 타당성이 있다고 본다.

References

- [1] Mir M. Ali, K. S. Moon, Structural Development in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects, Architectural Science Review, vol. 50.3, pp. 205-223, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.3763/asre.2007.5027>
- [2] K. S. Moon, J. J. Connor, J. E. Fernandez, Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design, The Structural Design of Tall and Special Buildings, vol. 16.2, pp. 205-230, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1002/tal.311>
- [3] J. H. M de Meijer, Lateral Stiffness of Hexagrid Structures, Master's thesis, Eindhoven University of Technology, Department of the Built Environment, 2012.
- [4] G. M. Montuori, M. Fadda, G. Perrela, E. Mele, Hexagrid - hexagonal tube structures for tall building: patterns, modeling, and design, The Structural Design of

Tall and Special Buildings, Vol. 24, pp. 912-940, 2015.

- [5] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korean Building Code-Structural, 2016.
- [6] MIDAS, Gen2017, v855 R2.

이 한 울(Han-Ul Lee)

[정회원]



- 2015년 8월 : 부경대학교 건축공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 부경대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2017년 1월 ~ 현재 : 아이스트 엔지니어

<관심분야>

합성구조, 철골구조, 초고층 구조

김 영 찬(Young-Chan Kim)

[정회원]



- 1983년 2월 : 서울대학교 건축학과 (공학사)
- 1985년 2월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학석사)
- 1995년 5월 : West Virginia University 토목공학과 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 건축공학과 교수

<관심분야>

합성구조, 철골구조